

#000001* JST COPYRIGHT
CN 86A0118545, E86062455

TI Noise in a CCD image sensor and the new low-noise read-out method.
AU NISHIDA YASUAKI, KOIKE JUNRO, OHTAKE HIROSHI, YOSHIKAWA SHIGEO
(NHKhosogiken)

JN F0330A (0386-6831) Terebijon Gakkaishi (Journal of the Institute of
Television Engineers of Japan)

VN VOL.39, NO.12 PAGE.1176-1181 1985

CI (A) (a1) (JA) (JPN) (FIG.7, TBL.1, REF.13)

AB To achieve a high-performance image sensor for a broadcast-camera, several
studies were made on noise characteristics in a CCD image sensor. This
paper deals with the noise evaluation method established for measuring
fixed-pattern noise (FPN) separately from random noise and new low-noise
read-out circuits using integration-type correlated double sampling (IDS),
and using delay and differential noise suppression (DDS). Measurements of
temperature dependence of dark current and FPN indicate that FPN is caused
nonuniformity of dark current in every pixel. (author abst.)

CC ND12032E, NC03130E (621.397.61, 621.382:537.222)

KW charge coupled device; television broadcast; noise reduction; image
quality; dark current; pixel; temperature dependence; amplifier; image
sensor

CCD型撮像素子のノイズと低雑音信号読出し法

正会員 西田泰章[†], 正会員 小池純郎[†]
正会員 大竹浩[†], 正会員 吉川重夫[†]

あらまし 固体撮像素子を放送用の高画質撮像素子として適用するために、付加ノイズ発生要因・量共に少ない CCD 型の低雑音化と今後の高画質化の可能性などについて種々の検討を行った。まず、ランダムノイズと固定パターンノイズ (FPN) を分離して定量的に測定することができる分析評価法を示した。次に、新開発の積分型相関二重サンプリング法、および遅延差雑音除去法を用いた低雑音化信号読出し回路により、ランダムノイズを暗電流のショットノイズの程度まで低減できることを示し、ノイズ低減効果の解析結果との良い一致も得た。さらに、暗電流と FPN の温度依存性の測定結果から、FPN の主因が暗電流の画素ごとのむらによるこども確かめた。これらの結果、CCD 型撮像素子の今後の低雑音化には、信号電荷読出し部のアンプノイズと、暗電流の低減化が重要であることを指摘した。

1. まえがき

近年、超 LSI 技術の進展とともに固体撮像素子の性能はますます向上し、その数々の特長を生かした適用分野は増大の傾向をたどっている。

固体撮像素子を放送用の高画質撮像素子として適用する場合、高感度、高解像度などとともに低雑音であることが重要な条件となる。そこで、まずランダムノイズと固定パターンノイズ (FPN) を分離して定量的に測定することができる分析評価法¹⁾を確立し、現状の固体撮像素子のノイズの詳細な解析を行った。その結果、CCD 型撮像素子が付加ノイズ要因・量ともに少なく、原理的に低雑音であることを確かめると同時に、ランダムノイズ、FPN の発生原因とその低減化の可能性なども検討できるようになった。

また、こうした検討の一環として、一般的に用いられているリセットノイズの除去法である相関二重サンプリング法を改良した積分型相関二重サンプリング法²⁾と、遅延線を用いた遅延差雑音除去法³⁾を開発し、信号電荷読出し回路の低雑音化を図った。これらの雑音除去法を用いることにより、ランダムノイズを暗電流のショットノイズの程度まで低減することができ

た。

さらに、上記の低雑音化の手法に加えて、暗電流と FPN の温度依存性の測定結果³⁾から、FPN の主因が暗電流の画素ごとのむらによるこども確かめ、暗電流の低減化により暗電流のショットノイズとともに FPN も低減化できるという見通しも得られた。

本論文では、こうしたノイズの解析とその低減化について以下に述べる。

2. CCD 型撮像素子のノイズ

CCD 型は、他の撮像素子と比較して、ノイズの発生しない完全転送モードとすることができることと、電荷検出に必要なリセットスイッチおよびアンプを 1 カ所としており、その容量も特に小さいことから、雑音発生源の要素となるものが少ないとえに、その発生量も極めて少ない。

ここで、CCD 型のノイズについてさらに詳細に検討を加えるため、表 1 に示すような各種ノイズ成分について解析を行った。さらに、他の撮像素子のランダムノイズについても代表的な例を示す。

2.1 信号量に依存するランダムノイズ成分

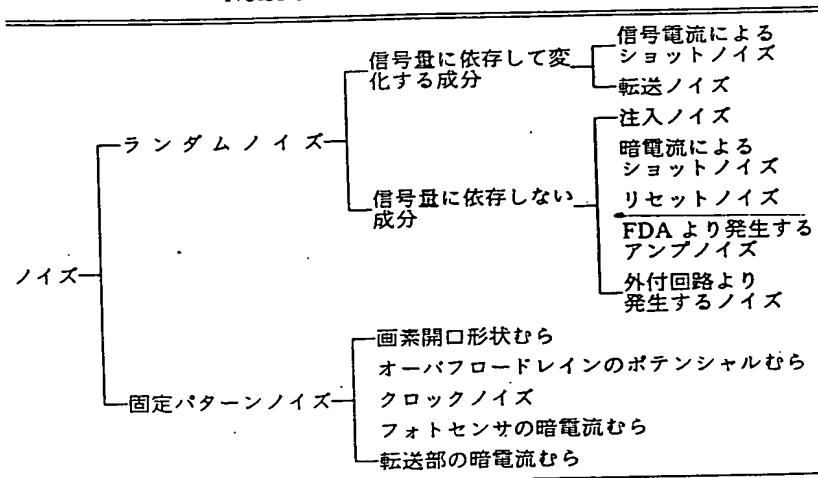
この成分のうち、光信号や信号電流によるショットノイズ N_{ns} は、光や電子が量子であるために生ずるもので、その rms 値は、次式で表されるように信号電荷量 N_s の平方根に比例する。

$$\bar{N}_{ns} = \sqrt{N_s} \quad (1)$$

[†] NHK 放送技術研究所

"Noise in a CCD Image Sensor and the New Low-noise Read-out Method" by Yasuaki Nishida, Junro Koike, Hiroshi Ohtake and Shigeo Yoshikawa (NHK Science and Technical Research Laboratories, Tokyo)

表 1 CCD 型撮像素子の各種ノイズ成分
Noise sources in CCD image sensor.



このノイズは、あらゆる撮像素子に原理的に存在するもので、固体撮像素子では、光電変換効率やフォトセンサの開口率を上げるなどして、信号量を増加させることにより S/N の改善を図っている。

転送ノイズ N_{nt} は、転送電荷量のゆらぎによって生じ、非転送効率 ϵ 、転送段数 M および、 N_s に依存して、

$$\bar{N}_{nt} = \sqrt{2\epsilon M N_s} \quad (2)$$

で与えられる。高解像度化した場合、転送段数の増加により N_{nt} も増加するが、現状で得られている 99.999 % 程度の転送効率では、信号量の減少に伴う ϵ の増大を考慮しても、信号電流のショットノイズと比較して極めて小さい値となると考えられる。

2.2 信号量に依存しないランダムノイズ成分

インプットノイズ N_{ni} は、フォトセンサから垂直転送部への不完全転送により生じ、その量はフォトセンサあるいは垂直転送セルの容量を C_d とすると、

$$\bar{N}_{ni} = \sqrt{\alpha k T C_d / q} \quad (3)$$

となる。 α は MOS スイッチの動作によって決まる定数で、1~2/3 の値をとる。また、 k はボルツマン定数、 T は絶対温度、 q は素電荷である。フォトダイオードセンサ ($C_d = 0.01 \text{ pF}$ 、 $\alpha = 1$ と仮定) を用いた場合、室温で約 40 el. rms 程度の雑音電子数となるが、完全転送が可能なフォトセンサ (例えば、MOS キャパシタセンサ、 $p^+ np$ 構造のフォトダイオードなど) を用いることによりなくすことができる。

アンプノイズは、フローティングディフュージョンアンプ (FDA) のソースホロワ FET から発生する熱雑音で、その雑音電子数 N_{na} が次式で表せる白色雑音成分、

$$\bar{N}_{na} = C_r \sqrt{4kT R_{eq} B} / q \quad (4)$$

と、 $1/f$ ノイズがある。後者は、100 kHz 以下で支配的となり、周波数に逆比例してノイズレベルが上昇するため⁴⁾、視覚上問題となる横引きノイズとなるが、相関二重サンプリング (CDS) 法などで大幅に低減することができる。(4)式で、 C_r は FDA の検出容量、 R_{eq} は等価雑音抵抗、 B は帯域幅である。

リセットノイズは、FD をリセットスイッチを介して充電するときの熱雑音によって生じるもので、雑音電子数 N_{nr} は、次式で与えられる。

$$\bar{N}_{nr} = \sqrt{kTC_r/q} \quad (4)$$

現状の CCD 型でこのノイズは、約 70 el. rms 程度であるが、CDS 法などの外部回路により除去が可能である。

しかし CDS 法では、FDA より発生するアンプノイズ N_{na} のうちナイキスト周波数以上の高域成分も同時にサンプルホールドするため、映像帯域に折り返り⁴⁾、約 40 el. rms 程度のノイズとなる。このノイズは、帯域の平方根に比例して増大するため、撮像管のヘッドアンプノイズ同様、広帯域化した場合、特に問題となってくる。

FDA から発生するアンプノイズは完全に除去することはできないが、後述の積分型相関二重サンプリング (IDS) 法などを用いることにより、リセットノイズを除去したうえで不要な低域および高域のノイズを最小限にすることができる。現状でも 13 el. rms 程度に低減することができる。

信号量に依存しないランダムノイズのうち、回路や素子構成上の工夫では除去できない成分として、暗電流のショットノイズが残る。このノイズは、他の固体撮像素子でも同様に発生するもので、その量は暗電流の平方根に比例し、結晶欠陥の量や質に依存すると考

えられる。現状の CCD 型では、 $0.2 \sim 0.5 \text{ nA}$ 程度の暗電流があり、 $10 \sim 20 \text{ el. rms}$ 程度のショットノイズとなる。暗電流は素子の温度を下げるなどして低減することができ、また、設計およびプロセス技術によって、欠陥を制御することによる低減が期待できる。

以上のことから、CCD 型のランダムノイズは、高照度時には信号電流のショットノイズが支配的で、低照度時にはリセットノイズが主成分であること、CDS 法を用いてリセットノイズを除去すると、注入ノイズとアンプノイズの高域成分が問題となってくるが、完全転送が可能なフォトセンサと、IDS 法などを用いることにより、暗電流のショットノイズが主成分になることなどがわかる。

なお、これらのランダムノイズは、すべて互いに相関がないため、総合的なノイズ量は各ノイズの 2 乗和の平方根となる。

ここで比較のため、他の撮像素子のランダムノイズについて代表例を挙げておく。例えば、MOS 型から発生するランダムノイズの主因は、主に水平 MOS スイッチの ON 抵抗の熱雑音によって生じるノイズと、ヘッドアンプノイズとがあり⁵⁾、雑音電子数に換算すると、前者が約 600 el. rms 、総合ノイズが約 1500 el. rms 程度となる。また、加速転送方式⁶⁾を用いた場合には総合ノイズが約 500 el. rms 程度に低減される。

撮像管では、光導電型の場合、ノイズ電流が帯域の $3/2$ 乗に比例して増加するヘッドアンプノイズが支配的となる。 $2/3$ インチサチコンの例⁷⁾では、この値が約 0.3 nA rms であり、性能限界にほぼ達しているともいわれている。

2.3 固定パターンノイズ (FPN) 成分

固体撮像素子では、画素の大きさのばらつきや、静電容量のばらつきなどによって、画面に固定して現れる固定パターンノイズ (FPN) が生じる。

この FPN は、現状ではほとんど目立たない程度であるが、感度を上げたり、ランダムノイズを低減していく場合に問題となってくる。また、画面の一定位置に固定されているため、ゆるやかなパンやチルトなどを行ったとき特に目立つ。

CCD 型の FPN は、画素ごとの暗電流むら、フォトセンサの開口むら、オーバフロードレインむらなどが原因となるが⁸⁾、現状では、後述するようにフォトセンサの暗電流むらによるものが主成分であると考えられる。

* 固体撮像素子との比較のために、サンプリング周波数を帯域の 2 倍と仮定すると、雑音電子数にして約 200 el. rms となる。この場合は、帯域の平方根に比例して増加する。

3. ノイズ計測法

固体撮像素子のノイズは、ランダムノイズと FPN が重畠して出力されるため、一般に用いられるノイズ測定器では、両者を分離して定量的に解析をするのは困難である。そこで筆者らは、撮像素子の駆動パルスに同期してノイズを計測することにより、ランダムノイズと FPN の分離を可能とし、定量的に分析評価できる方法を用いた。図 1 の測定系で、トリガパルス発生回路は、駆動回路（一般にはカメラに組み込まれている）より発生する駆動パルスをカウントし、任意の画素の信号出力タイミングに同期したトリガパルスを発生している。また、この画素の選択および計算処理はコントローラ（計算機）により行う。

ランダムノイズ成分は、同一画素の信号出力を何回も測定し、平均 2 乗誤差の平方根をとることにより算出する。1 つの画素に注目して測定しているため、FPN 成分が含まれないランダムノイズ成分のみが得られる。

FPN 成分は、各画素ごとに何回か測定しその値を平均することにより、ランダムノイズ成分を除去し求めることができる。統計的には、この平均回数を増すと、その回数の平方根に逆比例してランダムノイズが減少する。例えば、100 回平均を行えば $1/\sqrt{100}$ すなわちランダムノイズ成分は $1/10$ に減少する。

この計測法により、FPN より小さなランダムノイズを測定することが可能になると同時に、FPN の測定でもランダムノイズに影響されることなく、正確な測定が可能となる。

CCD 型の FPN の測定例を図 2 に示す。測定には、市販の CCD 型撮像素子 ($2/3$ インチサイズ、 $384(H) \times 490(V)$) を用いた。なお、図 2 の縦軸は素子出力に換算した値で、横軸は画素番地である。

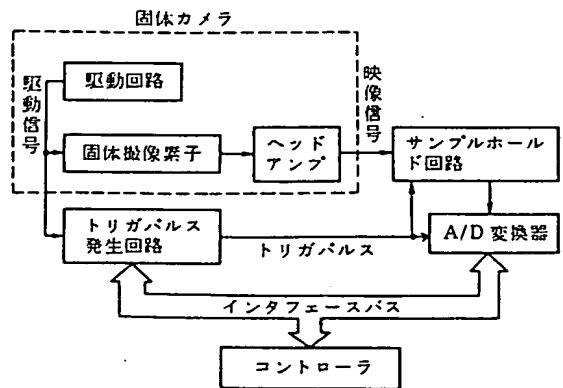


図 1 雜音測定システムの構成
Block diagram of noise measuring system.

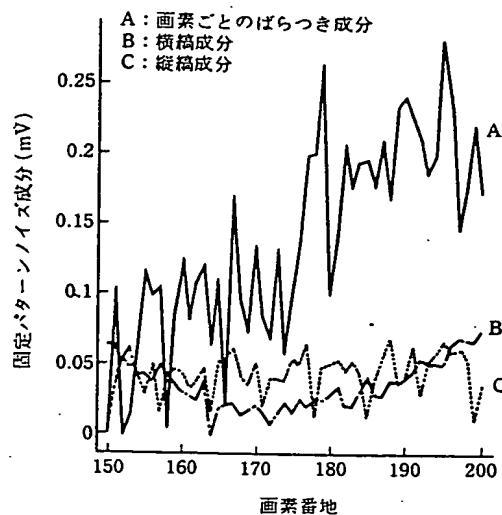


図 2 CCD 型撮像素子の固定パターンノイズ
Fixed-pattern noise of CCD image sensor.

A は縦方向同一線上を測定しているため、縦じま状の FPN 成分は含まれない。B は、横方向同一線上の 300 画素の平均を、縦方向の画素番地ごとにとったものである。このような計算処理を行うことにより FPN の横じま成分を求めることができる。この値には縦じま成分は含まれず、画素ごとのばらつき成分も画素数の平方根に逆比例して減少している。C は FPN の縦じま成分である。

B の横じま成分が少ないとから、A の測定値は画素ごとのばらつき成分と考えられ、また光を入れない状態で測定していることから、主にフォトセンサ部での暗電流むらが原因と考えられる。なお、C の縦じま成分が少いのは、垂直転送部の面積が大きく、転送部での暗電流むらが平均化され、ノイズにはなりにくいためと考えられる。

4. ランダムノイズの低減

相関二重サンプリング (CDS) 法を改良した積分型相関二重サンプリング (IDS) 法、および遅延線を用いた遅延差雑音除去法を用いることにより、リセットノイズと同時に 2.2 節で述べたアンプノイズの低域成分、高域成分を共に低減することができた。以下に、これらのノイズ低減法の原理および測定結果について述べるとともに、低減効果の解析を行い、その理論限界値についても示す。

4.1 ノイズ低減法

IDS 法の構成およびタイミングを図 3 に示す。この方法では、通常の CDS 回路の前段に積分回路を設け、フィードスルーレベルおよびシグナルレベルをそれぞれ一定期間積分を行い、その積分値の差をとること

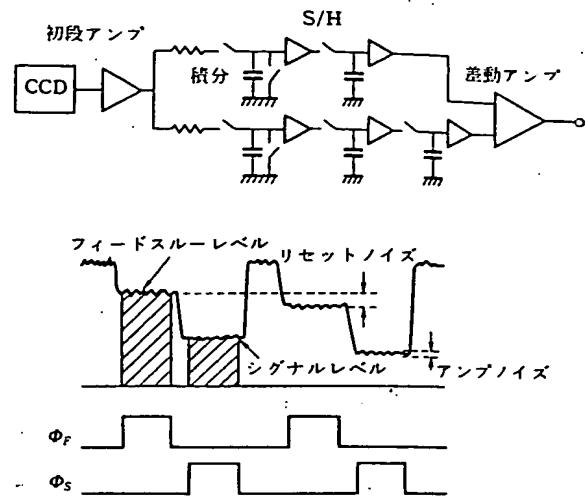


図 3 積分型相関二重サンプリング法の構成および原理
Schematic diagram and principle of integration type correlated double sampling (IDS).

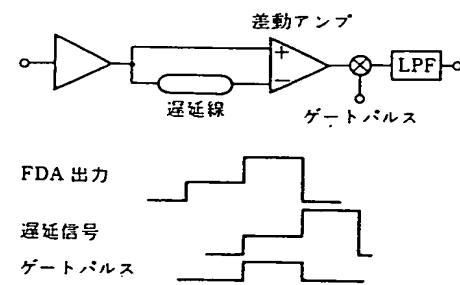


図 4 遅延差雑音除去法の構成および信号波形
Schematic diagram and signal waveforms of delay and differential noise suppression (DDS).

により、アンプノイズの高域成分とリセットノイズを同時に除去することができる。

FPN の測定と同一の素子を用い、前述のノイズ計測法により、IDS 法でのランダムノイズを測定した結果、FDA のアンプノイズを雑音電子数にして 13 el. rms まで低減することができた。また、暗電流のショットノイズは 20 el. rms であり、暗電流の測定値 (0.48 nA) から算出した値と一致している。

この結果、フォトセンサや転送部で発生する暗電流のショットノイズがランダムノイズの主成分となっていることが判明した。

これらのノイズと、外部回路への飛び込みなどによるノイズ成分 (14 el. rms) を合計すると約 28 el. rms となり、従来の方法 (CDS 法) では同じ素子で 70 el. rms であったのと比較して約 9 dB の改善が得られた。

さらに上記の方法に加えて、図4に示すように、遅延線を用いた遅延差雑音除去法の検討を行った。この方法では、遅延信号のフィードスルーレベルとFDA出力のシグナルレベルのタイミングを一致させ、その差をとった後、各信号が重複している期間をゲートパルスにより取り出し、ローパスフィルタで不要な高域成分を除去している。

いずれの方式でもアンプノイズに対する除去効果はほぼ同等であるが、遅延差雑音除去法では、全体に低インピーダンス設計が容易となるため、外部電波の飛び込みや電源ハムなどの影響が少なく、新たに加わる雑音をなくすことができた。またこの方法は、今後の多画素化に伴ってクロック周波数が増大した場合でも回路設計が容易という大きな特長を持っている。

4.2 ノイズ低減効果の解析

前記のいずれの方式でも、フィードスルーレベルおよびシグナルレベルについてそれぞれ一定期間の平均値をとり、その差を出力していると考えれば、ノイズ電力に対する信号応答は、図5のような窓関数のフーリエ変換の2乗と考えられ、次式で表せる。

$$F^2(f) = \left[\frac{\sin(\pi f \tau_1)}{\pi f \tau_1} \right]^2 \left[\sin(\pi f \tau_2) \right]^2 \quad (6)$$

読み出しクロック周波数7.2 MHzの撮像素子で、実際に使用した定数、 $\tau_1 = 40$ ns, $\tau_2 = 70$ nsをそれぞれ代入して計算すると図6となり、アンプノイズの低域成分および高域成分は共によく除去されることがわかる。また、アンプノイズの低域成分である $1/f$ ノイズはほとんど除去されるため、ここでは無視して、単

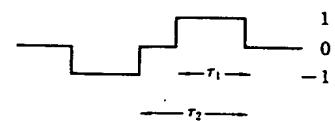


図5 サンプリング窓関数
Sampling aperture function.

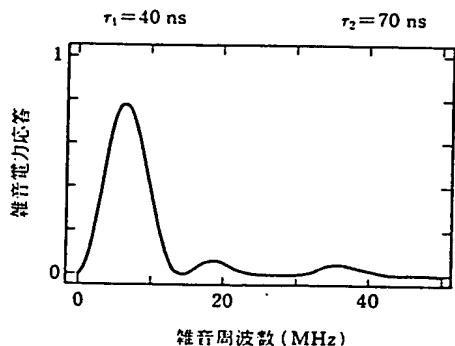


図6 雜音電力応答特性
Noise power response characteristics.

位周波数当たりの白色雑音を $\overline{E_n}^2$ とすれば、出力信号に現れる全ノイズ電力 N^2 は次式で表せる。

$$N^2 = \int_0^\infty F^2(f) \overline{E_n}^2 df = \overline{E_n}^2 \int_0^\infty F^2(f) df \quad (7)$$

実測した白色雑音の値は FDA の入力換算ノイズで約 $28 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ であり、電荷検出感度 ($5.5 \mu\text{V}/\text{el.}$) を考慮し雑音電子数に換算すれば、 $0.005 \text{ el.}/\sqrt{\text{Hz}}$ である。この値を(7)式に代入すれば、 N は 12.5 el. rms となり、試作回路におけるアンプノイズ成分の実測値(約 13 el. rms)とよく一致する。この結果は、 $1/f$ ノイズおよびリセットノイズが充分に除去されていると同時に、アンプノイズの低減効果も理論限界値に達していることを表している。

したがって、今後 CCD 型撮像素子のランダムノイズをさらに低減するには、FDA のアンプノイズそのものと暗電流のショットノイズの低減化を図らなければならぬことがこれらの結果から明白となった。

5. 暗電流およびFPNの温度特性

以上述べたように、ランダムノイズについては、暗電流のショットノイズとアンプノイズ以外は除去できることがわかった。暗電流は温度の低下とともに減少することが知られているが、FPNについても、素子の温度を下げ暗電流を減少させることにより改善できることを確かめた。

図7に、CCD型撮像素子の暗電流(I_d)および、FPNのp-p値、rms値についての温度依存性の測定データを示した。測定は、撮像素子パッケージの背面

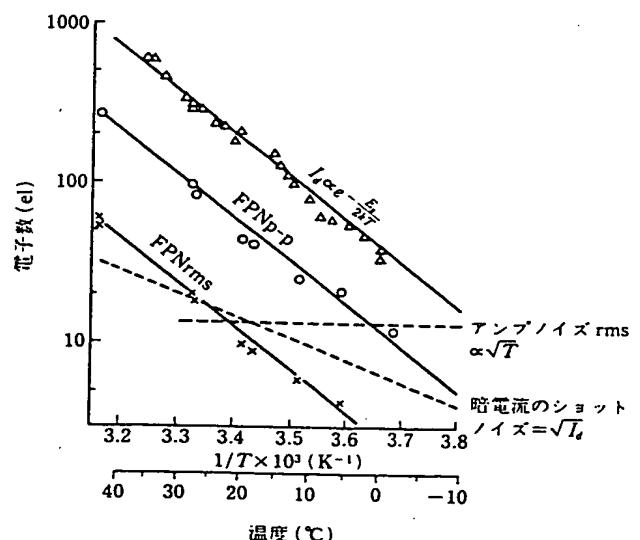


図7 暗電流、暗電流のショットノイズおよびFPNの温度変化

Dark current, dark current shot noise and FPN as a function of temperature.

に取り付けたペルチエ素子により温度を変化させて行った。FPN の温度変化については、3章のノイズ計測法の確立により測定可能となったものである。図から明らかかなように、この温度範囲では I_d の傾きが $e^{-E_{\text{th}}/2kT}$ と真性キャリヤ濃度の比例係数に一致しており、同時に FPN の p-p 値および rms 値も共に I_d と同じ温度特性を示すことがわかる。定性的には、これらのことから、画素ごとの暗電流むらが FPN の主原因であることと、温度を下げるこことにより大幅に低減できることが確かめられた。例えば、素子温度を 10°C 低下させれば FPN を約 6 dB 低減させることができる。

図 7 には、暗電流のショットノイズおよび FDA のアンプノイズの温度依存性も示した。アンプノイズは絶対温度の平方根に比例するため、この範囲ではあまり大きな変化は見られない。一方で、ランダムノイズの主成分である暗電流のショットノイズは、 I_d の 1/2 の傾きで変化する。また、一般に FPN の p-p 値とランダムノイズの rms 値が等しい場合、ノイズの見え方がほぼ同等であるといわれているが、図 7 によれば、FPN の p-p 値は、室温付近でリセットノイズとほぼ等しく、0°C 近傍で、IDS 法により低減したランダムノイズとほぼ等しくなることがわかる。

6. む す び

以上のような検討結果から、CCD 型撮像素子はノイズ付加の要素と量がともに少なく、さらに低減していくことにより、究極的には信号電流および暗電流のショットノイズとわずかなアンプノイズしか残らず、極めて低いノイズレベルとすることが可能であることがわかった。また、固定パターンノイズについても、暗電流の画素ごとのむらが主原因であることを確かめ、暗電流の低減化によって FPN および暗電流のショットノイズをともに減少できる見通しを得ることができた。

このような低ノイズレベルは他の固体撮像素子や撮像管では得られない値であるが、今後の高画質撮像素子を実現するためには、上記の低雑音化に加えて、高解像度化、高感度化などをさらに図っていかなければならぬ。

CCD 型の高感度化、高ダイナミックレンジ化に関しては、転送部の電荷転送能力を増大し、飽和信号量とともに、フォトセンサの開口面積を向上させた CSD 型撮像素子⁹⁾や、樹脂レンズアレイを集積化し、

実効的に開口率を高める方法¹⁰⁾や、走査部上に光導電膜を積層し、開口率、光電変換効率をともに向上する方法¹¹⁾など、着実に改善が図られている。また、高解像度化に関しても、現行方式程度の画素数については実現可能なレベルに達しつつある。さらに、固体撮像素子最大の欠点であるとされていたブルーミング、スミアについても、カウェル構造¹²⁾、FIT 方式¹³⁾などによって大幅な抑制が図られている。

しかし、今後の高品位テレビ方式（ハイビジョン）を想定（例えば 1700 × 1040 画素程度）した場合、単純な多画素化では、加工精度の問題ばかりではなく、画素面積の減少により飽和信号量および感度が低下するのと同時に、クロック周波数の増大（広帯域化）に伴ないアンプノイズ成分も増加するためダイナミックレンジが大幅（画面サイズを同一とすれば、約 20 dB 程度以上）に低下するなど課題は多く、さらに多くの検討が必要である。

最後に、本研究の機会を与えられた藤尾放送技術研究所長ならびに岡田物性素子研究部長、終始有益なご討論をいただいた当研究部固体グループの諸氏に深謝致します。

（昭和 60 年 8 月 12 日受付）

【参考文献】

- 1) 西田、大竹：“固体撮像素子のノイズ分析評価法”，昭 59 信学総全大、1341 (1984)
- 2) 西田、大竹：“積分形相関二重サンプリング法による CCD 撮像素子の低雑音化”，昭 60 信学総全大、1330 (1985)
- 3) 西田、小池、大竹、吉川：“CCD 形撮像素子の雑音解析と低雑音化”，テレビ全大、3-2 (1985)
- 4) 秋山、河野、寺西：“インターライン CCD イメージセンサの雑音特性”，テレビ全大、3-11 (1983)
- 5) 秋山、泉田：“MOS 形固体撮像素子の内部ランダム雑音の解析”，信学技報、ED 81-36, pp. 53-58 (1981)
- 6) 今出、衣笠、野田、鈴木、安藤：“加速転送 MOS 撮像素子を用いたカラーカメラの試作”，テレビ学技報、ED 838, pp. 13-18 (1985)
- 7) 名取、武内、大村、末岡、大関、谷岡：“NHK が開発した高性能カラーカメラ”，テレビ誌、36, 9, pp. 810-815 (1982)
- 8) 西田、大竹、吉川：“固体撮像素子のノイズ測定評価法の一検討”，NHK 月報、27, 10, pp. 419-423 (1984)
- 9) 木股、伝田、油谷、坪内：“電荷掃きよせ方式を用いた 1/2” 固体撮像素子”，テレビ学技報、ED 841, pp. 31-36 (1985)
- 10) 石原、谷垣：“樹脂レンズアレーを用いた高感度 CCD イメージセンサ”，テレビ全大、3-17 (1984)
- 11) 近村：“積層型固体撮像素子”，昭 58 電気四学会連大、18-3 (1983)
- 12) N. Koike, I. Takemoto, K. Sato, H. Matsumaru, M. Ashikawa, and M. Kubo：“An NPN Structure 484 × 384 MOS Imager for a Single-Chip Color Camera”，ISSCC 79, Dig. Tech. Papers, pp. 192-193 (Feb., 1979)
- 13) 黒田、堀居、松本、国井：“FIT-CCD 撮像素子”，テレビ全大、2-8 (1982)